

Freiformbarer und modularer DLR-Wabentank für die CNG-Anwendung.

Aktueller Stand des Validierungsvorhabens

Dipl.-Ing. Diego Schierle, Prof. Dr. Horst E. Friedrich

Institut für Fahrzeugkonzepte-Leichtbau und Hybridbauweisen
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Pfaffenwaldring 38-40

70569 Stuttgart

diego.schierle@dlr.de

horst.friedrich@dlr.de

Abstract: Erdgas wird aktuell als CNG (Compressed Natural Gas) in zylindrischen Hochdrucktanks gespeichert. Zur effizienteren Nutzung des vorhandenen Bauraums und der damit eingehenden Reichweitenerhöhung ist die zylindrische Bauweise für zukünftige Fahrzeug-Generationen in Frage zu stellen. Das patentierte Wabentankkonzept erzeugt dank der zu erzielenden Freiformbarkeit und der intensiven Nutzung von optimal ausgelegten Verstärkungsfasern die Möglichkeit neuartiger Bauraumnutzung bei minimaler Gewichtszunahme. Das neuartige Fertigungsverfahren bietet in Kombination mit dem Wabentank-Konzept einen Volumengewinn von bis zu 38% gegenüber konventionellen CNG-Speichersystemen, bezogen auf den vorhandenen Bauraum im Fahrzeug. Es wird verstärkt auf die Herausforderungen, Möglichkeiten und erzielten Fortschritte des Fertigungskonzeptes und des Gastanks eingegangen. Aktuell befindet sich das Wabentankprojekt in der Validierungsphase. Ziel ist es den vollständigen Fertigungsprozess durch automatisierbare und seriennahe Herstellungsprozesse aufzubauen und durch relevante Versuche zu validieren.

1 Motivation zur Nutzung eines bauraumadaptiven Gastanks

Aktuelle Kraftstoffe (Benzin und Diesel) werden im Fahrzeug unter atmosphärischem Druck gespeichert. Dadurch kann der Tank so ausgebildet sein, dass sich dieser der Fahrzeugarchitektur anpasst. Bei der Verwendung von Erdgas als CNG, steht dieses unter 200bar Betriebsdruck und wird in zylindrischen Körpern gespeichert. Der Freiraum der beim Ausbau des herkömmlichen Tanks entsteht wird demnach nicht optimal genutzt, siehe Abbildung 1-1.

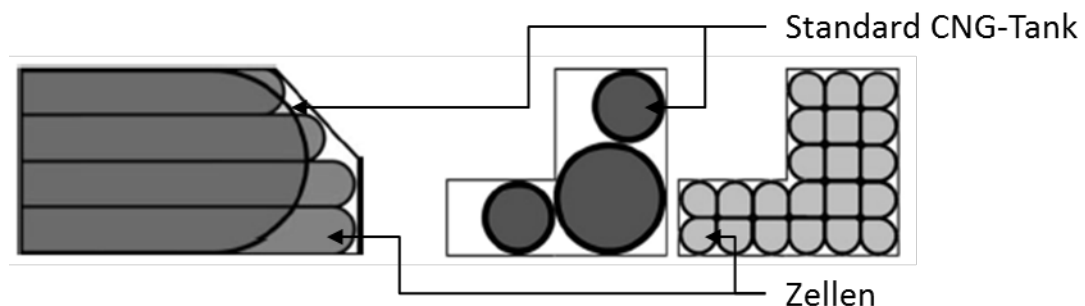


Abbildung 1-1: Bauraumabdeckung mittels Standard CNG-Tanks und Zellen des DLR-Wabentanks

In der linken Darstellung ist der Längs-Schnitt eines angewinkelten Bauraums dargestellt. Der Standard CNG-Tank kann diesen Bauraum schlechter ausfüllen als die kleineren und in ihrer Länge variablen Zellen. Im Querschnitt (Bild mitte: Standard CNG-Tank und Bild rechts: Zellen des Wabentanks) wird derselbe Nachteil deutlich.

Oft entfallen, um einen Tank mit relevantem Volumen einbauen zu können, relevante Bereiche des Fahrzeugs wie z.B. die Reserveradmulde [Aud13, Ope08]. Um diesem Volumenverlust entgegenzuwirken muss ein bauraumadaptiver Gastank entwickelt werden. Die Wabentankzellen ermöglichen eine vielseitigere und volumeneffizientere Nutzung des vorhandenen Bauraums. In der Fahrzeuggesamtbetrachtung bietet diese Bauweise eine deutliche Komfortsteigerung die nicht nur auf die Reichweitenerhöhung begrenzt ist.

2 Bauraumnutzung durch Wabenbauweise

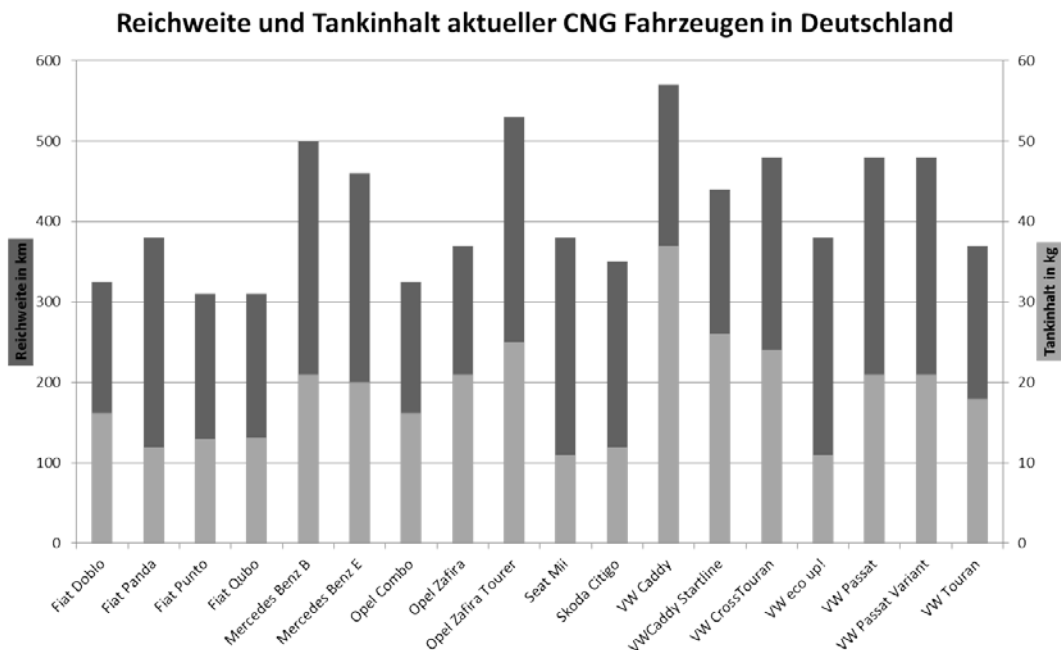



Abbildung 2-1: Reichweite und Tankinhalt aktueller CNG Fahrzeuge nach [N.N.2013]

Dank einer geringeren Schadstoffemission und geringeren Kosten pro gefahrenen Kilometer, verglichen mit Benzin oder Diesel, rückt die Nutzung von Erdgas als alternativer Energieträger und Brückentechnologie für den Verkehrssektor weiter in den Fokus [N.N11]. Abbildung 1-1 verdeutlicht dabei, dass aktuelle CNG Fahrzeuge im Erdgasbetrieb eine angemessene Reichweite erreichen um als Alternative angenommen zu werden.

Erdgas wird in der Fahrzeugindustrie in der Regel in zylindrischen Tanks gespeichert, siehe Abbildung 1-2 [EU11]. So besteht ein CNG1 Tank vollständig aus Metall, während CNG2 (FVK-Umfangswicklung) und CNG3 (FVK-Vollumwicklung) jeweils einen Liner besitzen der aus Metall ist. Dabei gilt, dass bei einem CNG2 Tank, der Metallliner eine tragende Funktion erfüllt, siehe [HS12], und bei einem CNG3 Tank dieser als Permeations-sperre dient, siehe [VNK95]. Anders als die vorigen Bauweisen verzichtet ein CNG4 Tank auf Metall und nutzt einen Kunststoffliner (FVK-Vollumwicklung) [KKKJ98]. Es ist festzuhalten, dass in der Entwicklung und Forschung zum Thema CNG-Speichertechnik der Schwerpunkt in der Gewichtsreduktion durch Werkstoffleichtbau liegt. Das DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte hingegen hat sich verstärkt dem Gestaltleichtbau für die CNG-Speicher gewidmet.



	CNG 1	CNG 2	CNG 3	CNG 4
Wicklung		Umfangswicklung	Spiralwicklung	Spiralwicklung
Gewichtseffizienz	0,95 - 1,15 kg/l	0,75 - 0,85 kg/l	0,38 - 0,68 kg/l	ca. 0,36 kg/l

Abbildung 2-2: Übersicht über die Klassen von Erdgastanks CNG 1 – CNG 4
[Sch08]

Ziel des Forschungsprojektes ist es die vorhandene Ressource „Bauraum im Fahrzeug“ maximal zu nutzen um dadurch einen Entscheidenden Vorteil zu erzielen.

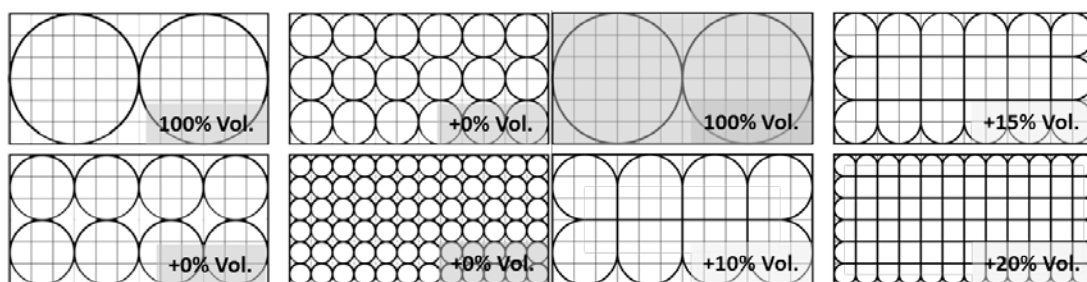


Abbildung 2-3: Vergleich der Bauraumausnutzung von zylindrischen Tanks (kein Volumengewinn möglich) mit der Wabenbauweise

Am Beispiel eines Rechtecks ($h \times 2h$) wird die Problematik in der Nutzung von zylindrischen CNG-Tanks verdeutlicht. Die Zylinder sind aufgrund Ihrer Geometrie und der mathematisch logischen Restriktion der „Anordnung als dichteste Packung“ darin eingeschränkt lediglich 78,75% des vorhandenen Volumens zu nutzen [Pei94]. Das neuartige Wabentankkonzept ermöglicht, u.a. aufgrund der Nutzung von quadratischen Zellen ein höheres Nutzen der Querschnittsfläche, siehe Abbildung 1-3. Je mehr Zellen des Wabentanks verwendet werden, desto mehr Volumengewinn ist theoretisch erreichbar.

Betrachtet man nun die Wandstärken der einzelnen Konzepte, wird eine Herausforderung des Wabentanks ersichtlich. Aufgrund der Vielzahl an Zellen, und dem Mehrfachen an Wandstärken, die dadurch entstehen, ist darauf zu achten, dass die Wandstärke minimal bleibt, siehe Abbildung 1-4. Die gestrichelt dargestellte „0“-Achse beschreibt das Referenzvolumen zweier rotationssym. CNG-Tanks. Die einzelnen Graphen stehen dabei für die unterschiedliche Anzahl der Zellen.

Es ist zu sehen, dass der 8x16 Wabentank zwar am meisten Volumengewinn erzeugen kann. Dieser Vorteil flacht aber bei steigender Wandstärke schnell ab. Schon bei einer Wandstärke von ca. 2,3mm ist dieser Aufbau volumenineffizienter als die Referenz. Diese Erkenntnis zwingt die Entwicklung in Richtung einer herausfordernden Fertigungstechnik, welche es ermöglicht einen modularen, bauraumadaptiven und dünnwandigen Tank zu erzeugen und in Richtung der Untersuchung von rotationssymmetrischen Tanks mit einer Liner-Wandstärke von 0,5mm.

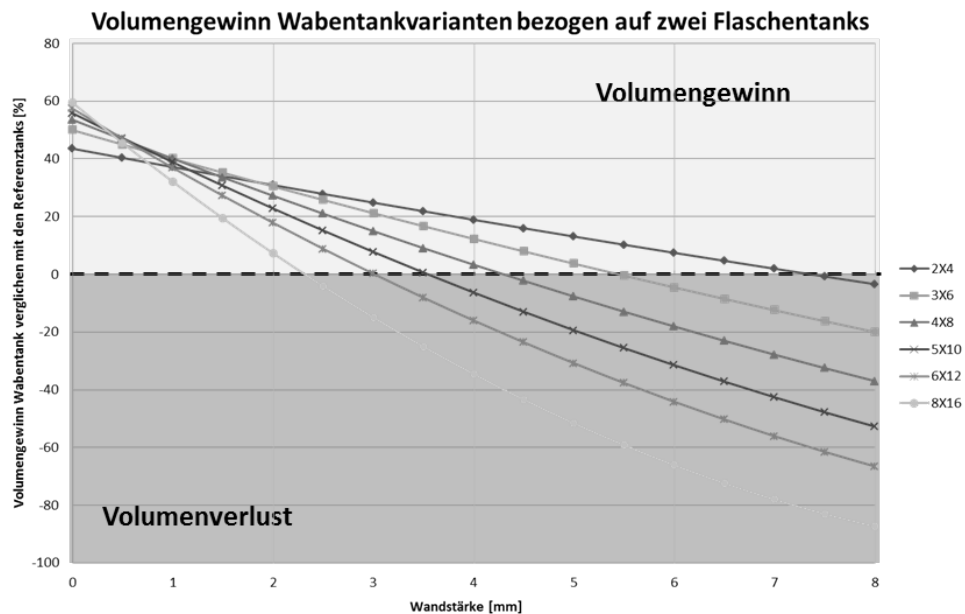


Abbildung 2-4: Volumengewinn/-verlust vom Wabentankkonzept unter Betrachtung verschiedener Anzahl von Zellen verglichen mit zwei Flaschentanks

3 Wabentankkonzept

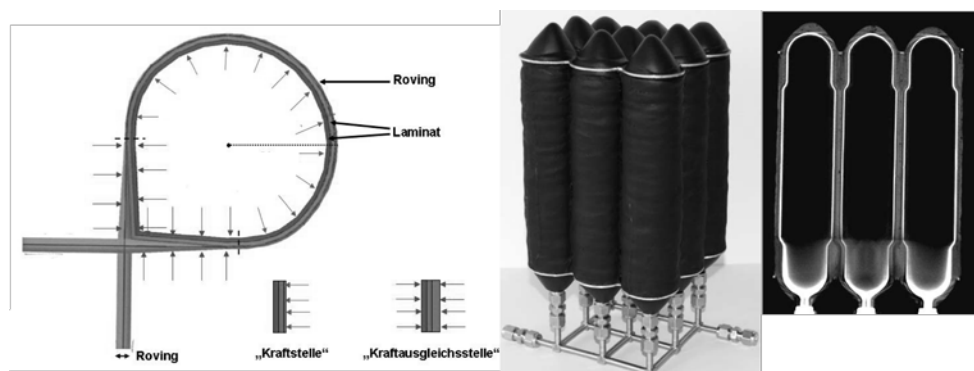


Abbildung 3-1: Proof-of-Concept DLR Wabentank [Sch11]

Das Wabentankkonzept basiert darin, dass die einzelnen Zellen die angeordnet werden, von einem geschlossenen Laminat umgeben werden. Die auf die Randbereiche des Tanks wirkende Druckkraft, an den Außenseiten des Tanks („Kraftstelle“, Abbildung 2-1), wird über einen Endlosroving an die gegenüberliegende Seite weitergeleitet. Die ebenen Bereiche der Zellen sind „Kraftausgleichsstellen“ in denen die wirkenden Kräfte sich aufheben [Str11]. Durch dieses Konzept wird es ermöglicht rechteckige Zellen für Hochdruckanwendungen zu nutzen.

Dass dieser Ansatz funktionsfähig ist, wurde in einem internen Projekt aus dem Jahre 2011 bestätigt, in welchem der Wabentank mit prototypischen und manuellen Fertigungsschritten gefertigt und anschließend positiv getestet wurde.

4 Herausforderung: Fertigungstechnik

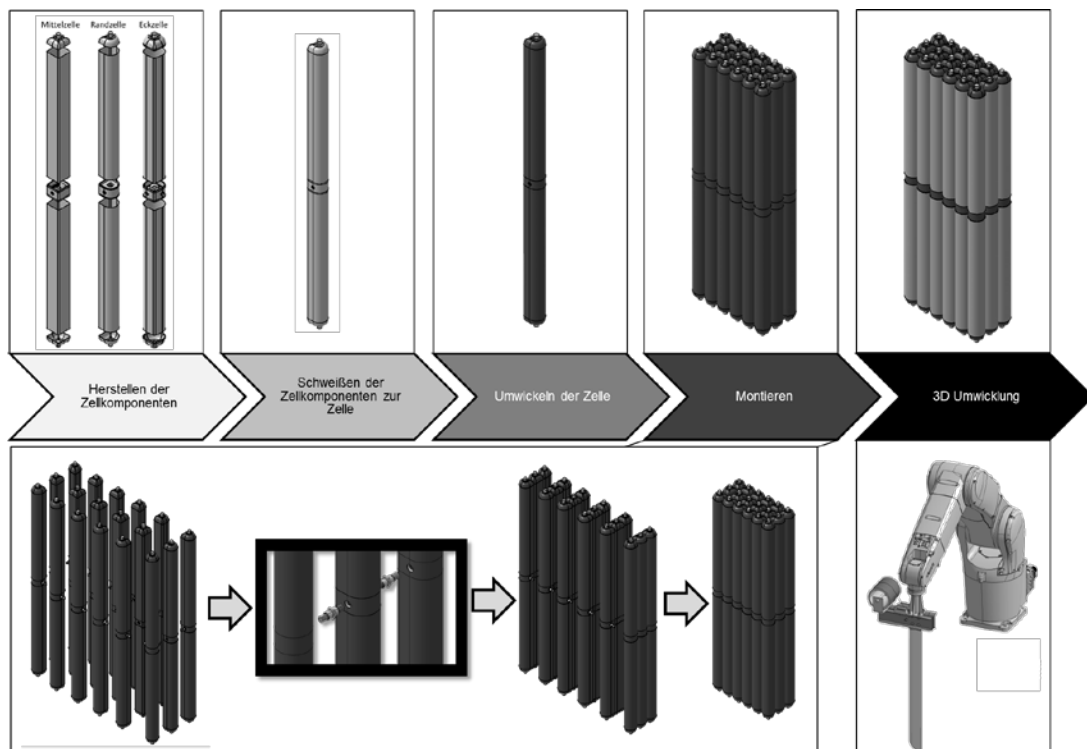


Abbildung 4-1: Prinzipielles Fertigungskonzept DLR-Wabentank

Das zu verfolgende Fertigungskonzept ist Abbildung 3-1 zu entnehmen. Die Besonderheiten dieses Prozesses liegen darin, dass jeder einzelne Fertigungsschritt automatisiert und modular ist und auf alternierende Bauräume flexibel reagiert werden kann. Somit wird der Vorteil des Wabentanks durch die vollständige Fertigungskette getragen.

Zu Beginn werden metallische Zellkomponenten hergestellt. Diese bilden den metallischen Liner. Jeder Liner besteht aus zwei Kappen, zwei Schäften und einem Mittelstück. Die Schäfte haben eine Wandstärke von 0,5mm und bilden den zentralen Raum als Gasspeicher. Die Komponenten werden ineinander gesteckt und miteinander verschweißt, siehe Abbildung 2-2.

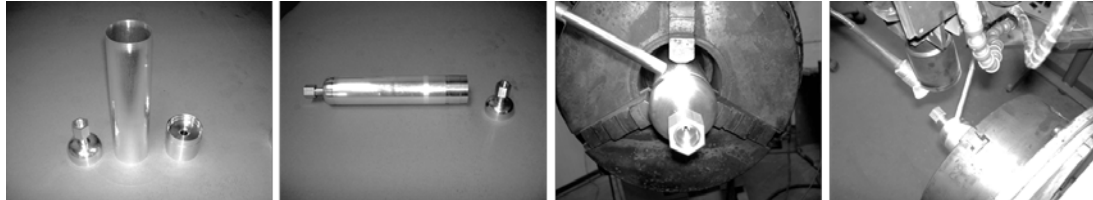


Abbildung 4-2: Aufbau eines 0,5mm Al-Monozellerliner

Anschließend werden die geschweißten Liner umwickelt. Diese Umwicklung übernimmt die Aufgabe der axialen Lastaufnahme.

Anschließend werden die einzelnen Zellen mittig mit einer Schraub-Steckverbindung verbunden um letztlich mit einer eigens entwickelten Vorrichtung die 3D-Wicklung aufzubringen, siehe Abbildung 3-3. Diese Vorrichtung wurde im Rahmen dieses Projektes erstmalig entwickelt, gefertigt und in Betrieb genommen.



Abbildung 4-3: Modell und Robotergeführtes Werkzeug zur Erzeugung der 3D-Endloswicklung

5 Erste Validierung an Monozellern

Die ersten drei Fertigungsschritte, die tatsächliche Tragfähigkeit des Laminats, die Dichtheit der Schweißnähte und die Verwendung von 0,5mm Aluminium als Liner werden erstmals an Monozellen validiert. Dabei sind Monozeller rotationssymmetrische Versuchsbauteile die nach dem beschriebenen Herstellungsprozeß erstellt werden, siehe Abbildung 4-1.

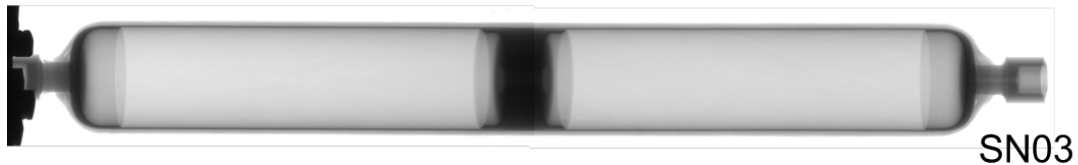


Abbildung 5-1: Röntgenaufnahme eines bewickelten Monozellers mit geschweißtem 0,5mm Al-Liner

Die Funktionsfähigkeit eines geschweißten 0,5mm Aluminium-Liners wird zu Beginn an Zugproben untersucht. Es wurden Zugprüfungen in der Zugprüfmaschine getestet mit dem Ziel der Ermittlung der erreichbaren Dehnung, siehe Abbildung 4-2.

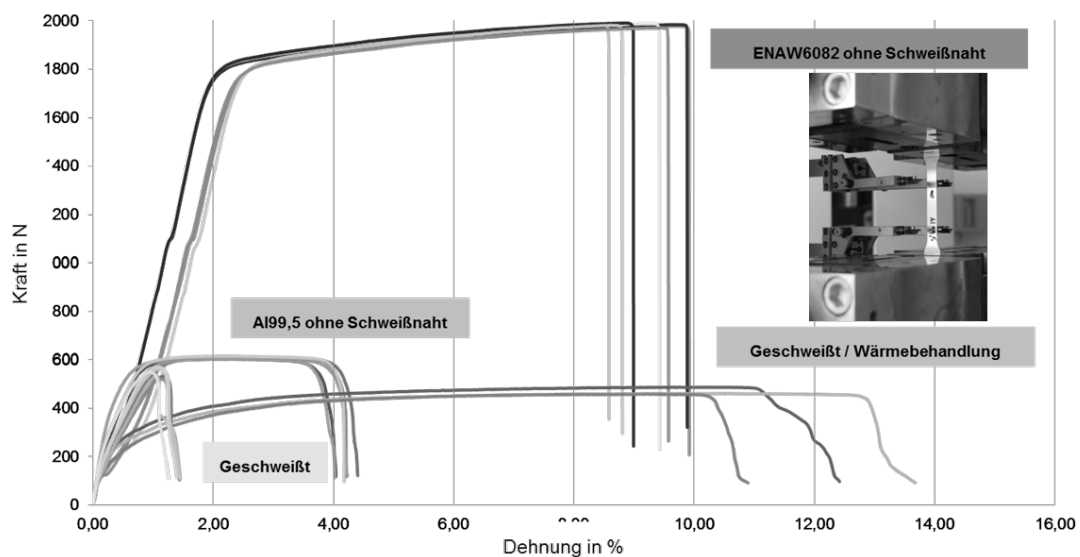


Abbildung 5-2: Dehnmesskurven von „voll“, „geschweißten“ und „geschweißt+wärmebehandelten“ Zugproben

Es wird verdeutlicht, dass geschweißte Al99,5 Proben die nicht wärmebehandelt wurden lediglich eine Dehnung von ca.1% erreichen. Mittels einer thermischen Nachbehandlung wird ein Versagen nach über 10% Dehnung erreicht. Durch die erhöhte Dehnung ist gewährleistet, dass sich der Liner bis zur kritischen Dehnung des Faserverbundes an das Laminat anlegt. Um die Verformung des Liners zu verdeutlichen wurden Versuche durchgeführt, siehe Abbildung 4-3. Die Liner-Berstversuche sind in Abbildung 4-3 zu sehen.

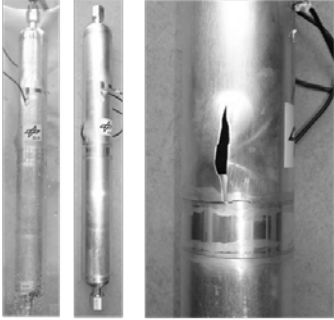
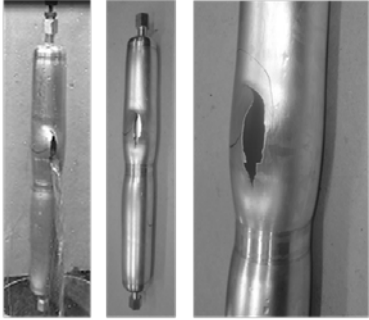
Ohne Wärmebehandlung	Mit Wärmebehandlung
	
<ul style="list-style-type: none"> • Keine plastische Deformation erkennbar • Riss in der Schweißnaht 	<ul style="list-style-type: none"> • Plastische Deformation >10% → Es ist gewährleistet, dass der Liner sich an das Laminat presst • Kein Schweißnahtversagen

Abbildung 5-3: Gegenüberstellung wärmebehandelter und nicht wärmebehandelter Liner

Der Liner der nicht wärmebehandelt wurde versagt ohne wesentliche plastische Verformung. Der Wärmebehandelte hingegen versagt mit einer plastischen Verformung von über 10% im Schaftbereich.

Die Versuche an den Monozellern haben ergeben, dass die Wärmebehandlung einen duktilen und gasdichten Liner mit 0,5mm Aluminium ermöglicht. Die Versuche sind durch Laminatversagen beendet worden. Dabei ist hervorzuheben, dass das Laminat an Bereichen mit Fertigungsfehlern versagt hat, siehe Abbildung 4-4.

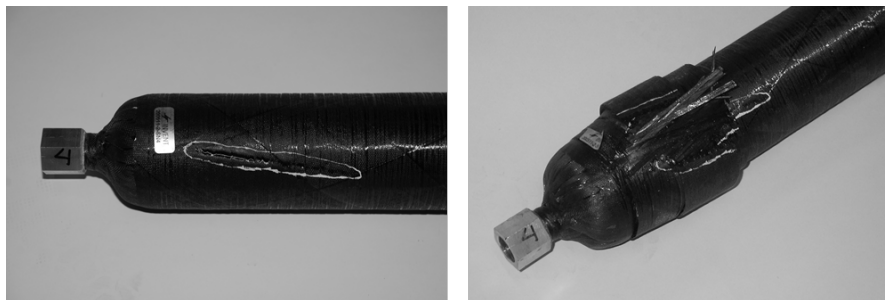


Abbildung 5-4: Kerbe im Laminat wird zur Sollbruchstelle

Die markierten Bereiche sind Einkerbungen im Laminat (Sollbruchstellen) die durch eine nachgelagerte Verpressung des Laminates bei zu geringer Vorspannung entsteht. An Bereichen dieser Verpressung haben alle getesteten Monozeller ausnahmslos unterhalb des „Soll-Berstdrucks“ versagt, siehe Abbildung 4-5.

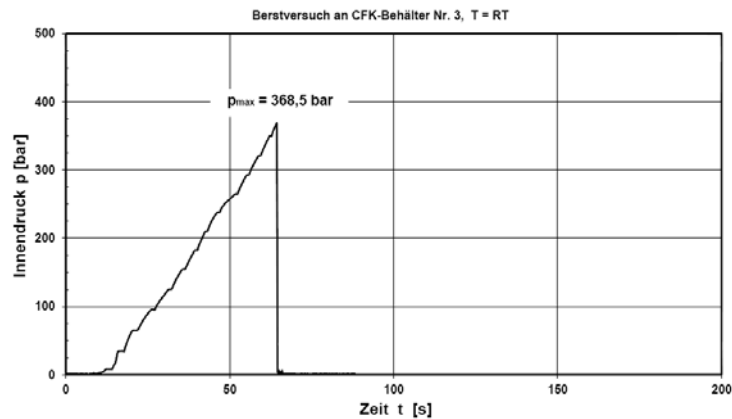


Abbildung 5-5: Versagen eines Monozellers mit fehlerhaftem Laminat

Es sind nachfolgende Untersuchungen an den Monozellern notwendig um die Tauglichkeit eines 0,5mm Al-Liners zu validieren. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass die Fertigungsfehler vollständig vermieden werden.

6 Entwicklung der 3D-Wickelvorrichtung

Die 3D-Wickelvorrichtung gewährleistet eine definierte Ablage des Rovingpfades, welcher in Abbildung 5-1 im hellsten Grauton dargestellt ist.

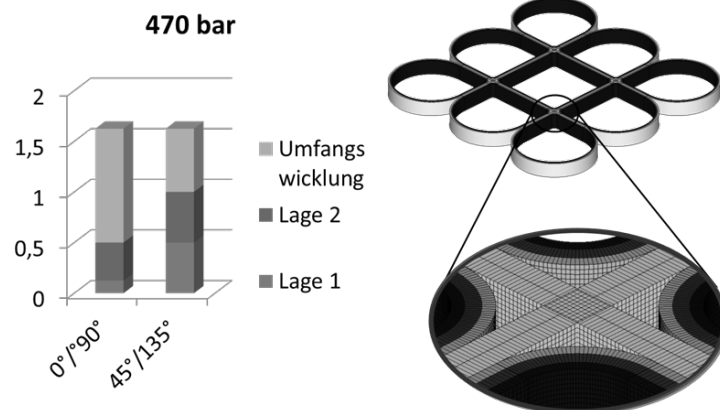


Abbildung 6-1: FEM-Simulation der 3D-Endloswicklung

Während der Konstruktion der Wickelvorrichtung wurde besonders darauf geachtet, dass diese die maximale Breite von 2mm nicht überschreitet. Der Roving wird dabei geschützt bis zum Ablagepunkt gefördert und nass aufgebracht. Die Wickelvorrichtung wird mittels eines Mehr-Achs-Roboters geführt. Der abzulegende Pfad wurde simuliert, siehe Abbildung 5-2. Die Verwendung eines Roboters zur Steuerung des Rovings ermöglicht die vollständige Anpassung des Fertigungsprozesses auf unterschiedliche Bauräume.

Zur Untersuchung und Validierung des Werkzeuges wurde dieses auskonstruiert, gebaut, ein Mehr-Achs-Roboter bereitgestellt und ein Ureolmodell gefertigt. Mittels des Ureolmodells, welches einen Zellenabstand von 2,2mm besitzt, können erste Voruntersuchungen durchgeführt werden.

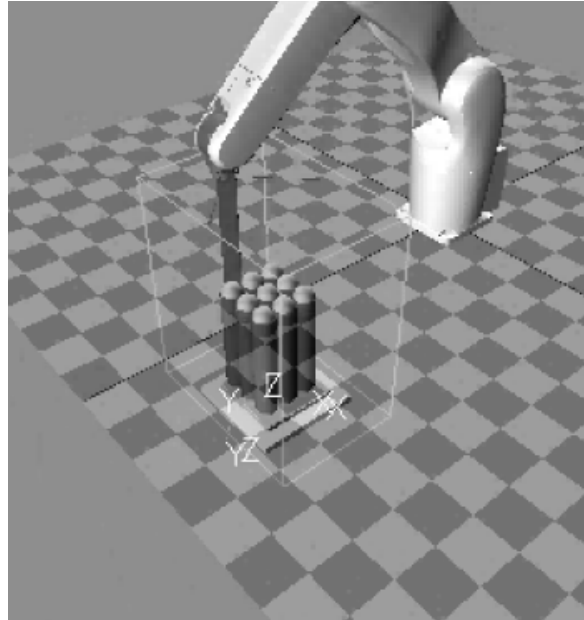


Abbildung 6-2: Bewegungssimulation der robotergesteuerten Wickelvorrichtung

Da der Wabentank sich den Begebenheiten eines Fahrzeugraums besser anpassen kann muss der Kunde mit keinem Komfortverlust mehr rechnen. Fahrzeuge können weiterhin so ausgelegt werden, dass die Tankentwicklung parallel zur Strukturentwicklung durchgeführt werden kann und diese dann zu einem späteren Zeitpunkt zusammengeführt werden. Der Wabentank bietet somit durch seine Bauraumadaptivität die Möglichkeit für unterschiedliche Fahrzeugkonzepte angewandt zu werden und in unterschiedlichen Entwicklungsstufen in Betracht gezogen zu werden.

7 Literaturverzeichnis

- [EU11] Europa (UN/ECE), Vereinten N.: Regelung Nr. 110 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, 2011.
- [HS12] Hyun-Sup, L.; No-Hoe J.; Cheal-Ho S.; Jong-Kyu L. L.; Jong-O: Damage evaluation for Type-II CNG cylinder by the analysis of AE parameters. In: 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission, University of Granada, 12-15 September 2012.
- [KKKJ98] Kim, B.S ; Kim, B.H ; Kim, J.B ; Joe, C.R: Study on the development of composite CNG pressure vessels. In: Cryogenics 38 Nr. 1, 1998.
- [N.N.2013] N.N.: Aktuelle CNG-Personenfahrzeuge in Deutschland. <http://www.gibgas.de/Fahrzeuge/Personenfahrzeuge>. Version: 08 2013.
- [N.N11] N.N.: Positionspapier: Umweltschonende Mobilität mit Erdgas und Bio-Erdgas. <http://www.bdew.de/internet.nsf/>.Version: 02 2011
- [Pei94] Peikert, Ronald: Dichteste Packungen von gleichen Kreisen in einem Quadrat. In: Elemente der Mathematik 1,1994.
- [Sch08] Schöll, R.; Kriescher, M.; Kopp, G.; Toso, Y.: Lasttragende Leichtbauteile für ein neues Gastank-Konzept, ATZ 10/2008, Vieweg Verlag, S. 932 – 938
- [Sch11] Schöll, R.; Straßburger, P.; Entwicklung eines Funktionsmusters für einen CNG Flachtank in DLR-Wabenbauweise, DLR intern, 2011.
- [Str11] Straßburger, P. Schöll, R, Krishnamoorthy, S. K., Friedrich, H.E., Zukunftsweisende Gastankstruktur in Wabenbauweise „proof of principle“, 6. Tagung GasfahrzeugeDie ehrliche und wirtschaftliche CO2-Alternative, 2011.
- [VNK95] Varga, L.; Nagy, A.; Kovacs, A.: Design of CNG tank made of aluminum and reinforced plastic. In: Composites 26, 1995.
- [Ope08] GM Global T. Patent DE 10 2007 017 429 A1 Sicherheitsanordnung für Gastank eines Kraftfahrzeugs. 2008
- [Aud13] Audi AG: Audi e-gas neuer Kraftstoff. Zugriff 20.09.2013 http://www.audi.de/de/brand/de/unternehmen/corporate_responsibility/produkt/audi-e-gas_-neuer-kraftstoff.html. 2013